

PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LA UNIDAD ARCOSAS DEL TESO GRANDE (SALAMANCA)

J. Nespereira, M. Yenes, J.A. Blanco y M.D. Pereira

*Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Plaza de la Merced s/n, 37008 Salamanca.
jnj@usal.es*

Resumen: Este trabajo se centra en el estudio y descripción de la unidad Arcosas del Teso Grande, en la que se cimientan gran parte de los edificios del centro histórico de la ciudad de Salamanca. Si bien la geología de la ciudad y su entorno urbano ha sido estudiada por numerosos autores a lo largo de las últimas décadas, hasta el momento sus propiedades geotécnicas no habían sido analizadas. El objetivo final es presentar una serie de parámetros de referencia para estos materiales a los que se pueda recurrir a la hora de afrontar cualquier tipo de construcción sobre ellos. Las Arcosas del Teso Grande constituyen una unidad tipo litológica, con características propias de un suelo, y están delimitadas tanto a techo como a muro por materiales rocosos. Para su caracterización geotécnica se han realizado tanto ensayos de laboratorio como ensayos *in situ*. Además se ha estudiado la mineralogía de esta unidad por medio de análisis de difracción de rayos X. La unidad tipo litológica Arcosas del Teso Grande se ha dividido en dos unidades tipo geotécnico: una granular y otra cohesiva, con comportamientos geomecánicos distintos.

Palabras clave: unidad tipo geotécnica, suelos, caracterización geotécnica, Cuenca del Duero, Salamanca.

Abstract: This paper deals with the *Arcosas del Teso Grande* geotechnical unit, which constitutes the foundations of buildings placed in the city centre of Salamanca (W of Spain). Geology of the area has been studied for several authors before, but a systematic characterization of their geotechnical properties have not been done until authors of this paper started to work on it. A first approach to the main parameters governing the mechanical behaviour of this unit has been done, which will be very useful when dealing with construction activities on these materials. *Arcosas del Teso Grande*, a geotechnical unit with soil features and located between rock materials, are described using either *in situ* and laboratory tests. On the first ones, standard penetration tests data have been analyzed, as well as velocity of P seismic waves. On the laboratory test, particle size distribution, mineralogy, moisture content, Atterberg limits, bulk and dry density, specific gravity, void ratio, Lambe swelling index, overburden pressure, oedometric, uniaxial compression and finally direct shear tests have been done. *Arcosas del Teso Grande* geotechnical unit has been divided in two subunits: the granular and the cohesive one, with different geomecanical behaviour, according to the investigations carried out.

Key words: Engineering geological type, soils, geotechnical characterization, Duero Basin, Salamanca.

Nespereira, J., Yenes, M., Blanco, J.A. y Pereira, M.D. (2006): Propiedades geotécnicas de la Unidad Arcosas del Teso Grande (Salamanca). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19 (3-4): 181-196.

El importante crecimiento experimentado por las ciudades en los últimos años ha puesto de manifiesto la necesidad de contar con un buen conocimiento previo tanto de la geología como del comportamiento geotécnico del terreno. Los trabajos encaminados hacia este objetivo han de tener como meta la unificación de toda la información en un documento cartográfico, el mapa geotécnico a gran escala (1:25.000 o mayor) que permita afrontar los futuros planes de desarrollo urbano con un conocimiento previo de las propiedades geomecánicas de los materiales de cada zona. Este tipo de documentos favorece la mejora de las condiciones de seguridad de las actuaciones proyectadas y facilita la optimización económica de cada una de ellas, como se ha podido comprobar en aquellas ciudades españolas en las que ya es una realidad (León: López Santiago *et*

al., 1991a; Ponferrada: López Santiago *et al.*, 1991b; Murcia: Ayala *et al.*, 1991; Cartagena: IGME-COPOC, 2000; etc.)

Los mapas geotécnicos se articulan en base a la definición de una serie de unidades geotécnicas. Para realizar la cartografía para mapas de gran escala, se parte de la definición de una serie de unidades denominadas tipos litológicos (TL), que son homogéneas en su composición y estructura, pero no uniformes en cuanto a sus características físicas, no siendo posible aportar propiedades mecánicas medias para todo el conjunto de la unidad. Una vez definidas éstas, es posible definir las unidades tipo geotécnicas (TG), con una mayor homogeneidad litológica y física, y cuya caracterización proviene de los valores medios de sus propiedades geotécnicas (UNESCO-IAEG,

1976; IAEG, 1981). Éstas a su vez se obtienen de la realización de ensayos, tanto *in situ* como en laboratorio, de identificación y evaluación de propiedades físicas y mecánicas.





	Edad			(A) Alonso Gavilán <i>et al.</i> , 1992 SO de la Cuenca del Duero	(B) Santisteban <i>et al.</i> , 2000 Hoja 478 (Salamanca) del Mapa Geológico de España, escala 1:50000	(C) En este trabajo entorno urbano de la ciudad de Salamanca, escala 1:25000
NEÓGENO	Mioceno	Superior	Conglomerados de la Armuña			-----?????----- Arenas y conglomerados arcóscicos de El Viso
		Medio		Unidades 19 y 21		 Serie Roja
		Inferior		(19) Gravas, arenas y arcillas rojas (21) Arenas y gravas con cemento carbonatado (costras)		
CENOZOICO	PALEÓGENO	Oligoceno	Formación Areniscas de Molino del Pico	Unidades 17 y 18 (18) Conglomerados y arenas (17) Arcosas y gravas arcóscicas		<i>Laguna estratigráfica</i>
			Formación Areniscas de Aldearrubia-Molino del Pico			
		Eoceno	Superior	Unidades 15 y 16		Areniscas de Cabrerizos
			Formación Areniscas de Aldearrubia	(16) Litoarcosas, litoarenitas y fangos rojos cementados por carbonatos (15) Litoarcosas, litoarenitas y fangos ocreos cementados por carbonatos		
			Medio			
		Inferior	Formación Areniscas de Cabrerizos			 Arcosas del Teso Grande
				Unidad 14 Arcosas y gravas arcóscicas con tinciones por óxidos de hierro		
MESOZOICO	Cretácico	Sup		Unidades 11, 12 y 13 (13) Conglomerados, areniscas y lutitas cementadas por sílice y hierro (12) Ferricretas de canal (11) Conglomerados y areniscas cementados por hierro con matriz caolinitica		 Alteración caolinitica del zócalo ?????
		Med		?????		
		Inf				
PALEOZ.	Ordovícico		Pizarras y cuarcitas	Unidades 10 y 11 (10) Pizarras grises y negras (9) Ortocuarzitas (Cuarcita armoricana)		Pizarras Cuarcitas

Tabla 1.- Columna estratigráfica general del Terciario (A) para el borde SO de la Cuenca del Duero (Alonso Gavilán y Sánchez Benavides, 1992), (B) según la hoja 478 del MAGNA (Santisteban *et al.*, 2000), (C) para el entorno urbano de la ciudad de Salamanca. Para la columna (C), líneas en diente de sierra, discordancia angular erosiva; líneas onduladas, paraconformidad.

La realización de la cartografía geológico-geotécnica de la ciudad de Salamanca a escala 1:25.000 en la que los autores de este artículo vienen trabajando durante los últimos años, ha llevado a la identificación de una serie de unidades tipo litológico. Entre ellas se encuentra una unidad arcósica de singular importancia dado que su localización coincide, en gran parte, con la zona centro de la ciudad. Es aquí donde se asientan importantes monumentos como la Plaza Mayor y otros edificios históricos. Geológicamente, esta unidad se sitúa entre la Formación Areniscas de Salamanca, a muro, y la Formación Areniscas de Cabrerizos, a techo. La estratigrafía y definición de estas dos unidades fueron realizadas hace varios años por Alonso Gavilán (1981) y, más recientemente, modificadas por Santisteban *et al.* (2000). Respecto a este último documento, este trabajo presenta algunas modificaciones que son fruto de la cartografía detallada a escala 1:25.000 que ha sido realizada para el trabajo de Tesis Doctoral de uno de los firmantes (J. Nespereira, en preparación). En definitiva, la propuesta que se hace es incluir la Unidad TL «Arcosas del Teso Grande» entre las formaciones rocosas «Areniscas de Salamanca» y «Areniscas de Cabrerizos» (Tabla 1). En la citada tabla se hace una diferenciación geotécnica de las formaciones consideradas suelos y las consideradas rocas, entendiendo por suelos todo aquel material fácilmente disgregable por medios mecánicos sencillos y de resistencia muy baja (González de Vallejo *et al.*, 2002), y por rocas los materiales con resistencias mayores. Conviene señalar que en las dos formaciones en contacto con la Unidad Arcosas del Teso Grande, se pueden encontrar niveles de suelos, si bien su carácter ocasional hace que ambas se puedan clasificar como rocosas. Análogamente, de manera puntual aparecen

zonas cementadas en la Unidad Arcosas del Teso Grande, pero su representatividad es muy baja.

La metodología del trabajo parte de una cartografía geológica de la ciudad de Salamanca, para la que dada la ausencia de afloramientos, resulta imprescindible hacer un seguimiento de las excavaciones de nuevos edificios en las que poder observar la geología de la ciudad, así como realizar una toma de muestras. Los datos de ensayos *in situ* se obtuvieron a partir de la recopilación de diversos informes geotécnicos inéditos, cedidos para su revisión por diversos organismos públicos. Finalmente, se recogieron un total de 25 muestras (tanto inalteradas en sondeos o talladas *in situ*, como alteradas obtenidas en afloramientos y excavaciones) de acuerdo con las recomendaciones dadas por la UNESCO/IAEG (1976), que fueron ensayadas en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Salamanca.

Contexto geológico

La ciudad de Salamanca se encuentra en el borde suroccidental de la cuenca del Duero. Esta singular ubicación permite distinguir claramente dos dominios: por un lado el Varisco, y por otro el Cenozoico (Fig. 1). Dentro del dominio Varisco, los materiales más antiguos que afloran en el entorno urbano de la ciudad son cuarcitas de edad ordovícica (Cuarcita Armoricana), localizadas al sur. Por encima, y constituyendo el basamento de parte de la ciudad, se encuentran unas pizarras grises y negras de edad ordovícica (Díez Balda, 1986). Una característica del zócalo varisco es que presenta una importante alteración de edad mesozoica (Blanco *et al.*, 1983; Nespereira *et al.*, 2003) que ha sido fosilizada por la Formación Areniscas de Salamanca.

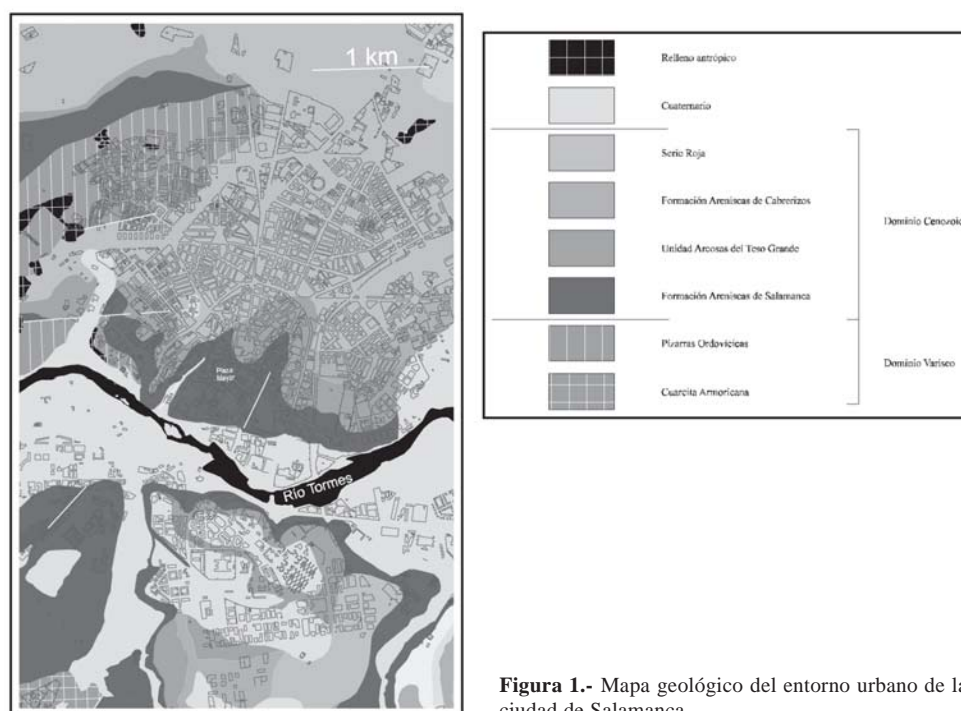


Figura 1. Mapa geológico del entorno urbano de la ciudad de Salamanca.

En el dominio Cenozoico, la serie comienza con la Formación Areniscas de Salamanca, de edad Cretácico superior - Paleógeno inferior, formada por gravas, conglomerados, areniscas y fangos ordenados en secuencias granodecrecientes cementadas por sílice, hierro o caolinita (Santisteban *et al.*, 2000). Sobre ella, dispuesta de manera concordante pero a través de un contacto erosivo, se encuentra la Unidad TL Arcosas del Teso Grande. A continuación, discordante, se sitúa la Formación arcósico-lítica Areniscas de Cabrerizos (Jiménez, 1972; Alonso Gavilán, 1981; Santisteban *et al.*, 2000), formada por areniscas de grano grueso a fino, dispuesta en cuerpos tabulares y lenticulares intercalados entre limos areno-arcillosos de color amarillento, con paleosuelos y encostramientos carbonatados.

En diferentes puntos de la ciudad, de manera discordante y claramente erosiva, se dispone la Serie Roja (Fig. 2), de edad miocena. En ella se distingue una Unidad Basal, de depósitos arenosos, arenoso-conglomeráticos y conglomeráticos de naturaleza lítica, y una Unidad Superior, compuesta por depósitos más ricos en arcillas, pudiéndose encontrar en ocasiones depósitos carbonatados (Santisteban *et al.*, 2000).

Los materiales cuaternarios del entorno urbano de la ciudad se sitúan en los alrededores del curso del río Tormes, y corresponden mayoritariamente a su actual llanura de inundación y a las terrazas bajas.

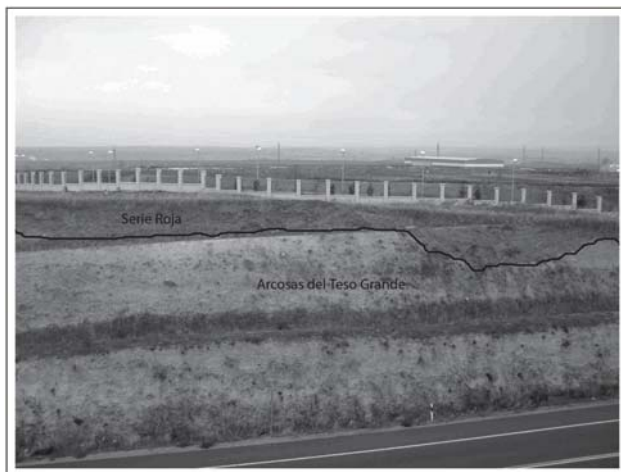


Figura 2.- Contacto erosivo entre la unidad TL Arcosas del Teso Grande y la Serie Roja.

Descripción de la columna tipo

Aunque no es objetivo de este trabajo realizar un exhaustivo análisis de la estratigrafía de la Unidad TL Arcosas del Teso Grande, en este apartado se incluye la descripción de la columna tipo (Fig. 3), localizada en el afloramiento de las inmediaciones del antiguo vertedero de la ciudad de Salamanca, en la zona conocida como Teso Grande (N-620, p.k. 238+500), de coordenadas UTM: x-273936.200; y-4540545.900 En ella se han medido hasta 29 metros de potencia, aunque hay que señalar que el hecho de que no se haya

observado de manera directa el contacto con los materiales rocosos de muro (Formación Areniscas de Salamanca), y de que a techo aparezca truncada por la Unidad Basal Serie Roja a través de una discordancia erosiva (Fig. 2), indica que es posible que haya zonas donde esos 29 metros sean superados.

Las siglas empleadas para la denominación de cada tramo se corresponden con las recomendadas por la Norma UNE-EN ISO 14688-1 (AENOR, 2002), empleada en el ámbito de la geotecnia (Tabla 2).

Abreviatura	Significado	Abreviatura de prefijos	Significado
Gr	grava	C	gruesa
Sa	arenas	M	media
Si	limos	F	fin
Cl	arcillas		

Tabla 2.- Simbología empleada en geotecnia para la descripción de campo de los suelos, norma UNE-EN ISO 14688-1 (AENOR, 2002). En mayúsculas y a la derecha se escribe la fracción principal, y hacia la izquierda y en orden de importancia decreciente, el resto. Ejemplo: clCSa, arenas gruesas con arcillas.

- 0-0,2 m: la columna empieza con 20 cm de arcillas limosas (siCl) de color verde pistacho de alta plasticidad, presentando algunos cantos de cuarzo de hasta 0,5 cm de diámetro.
- 0,2-1 m: arenas gruesas con arcilla verdosa y algunos cantos tamaño grava (grclCSa). La mineralogía de los cantos está formada por cuarzo y feldespatos potásicos de formas subredondeadas a subesféricas. En todo el tramo se aprecian tinciones rojizas debidas a hidromorfías de la Unidad Basal de la Serie Roja. En este tramo hay inicialmente una secuencia decreciente (tamaños arena media-fina) que pasa a mitad de tramo a ser creciente.
- 1-3 m: arcilla limosa (siCl) equivalente a la del tramo 1, observándose además algunas zonas que han sufrido procesos de carbonatación.
- 3-3,8 m: arena gruesa con arcillas y gravas (grclCSa), de color verdoso, similar al tramo 2.
- 3,8-5,1 m: gravas finas con cantos de grava (clsacgrFGr), algunos de hasta 5 cm, y que se alinean formando estratificaciones cruzadas. Los cantos son principalmente de cuarzo blanco y lidita, aunque más escasos aparecen algunos de cuarcita. Se observan tinciones rojizas. Los últimos diez centímetros del tramo dan un pequeño resalte y destacan por su mayor tono rojizo.
- 5,1-7,1 m: arcillas arenosas (saCl) que pasan a arcillas a mitad del tramo (Cl). De color verde pistacho y con alta plasticidad.
- 7,1-7,7 m: gravas finas en matriz arcillosa (clFGr).

8. 7,7-10,4 m: arcilla algo arenosa con cantos de cuarzo de hasta 1 mm (saCl). Presenta una fracturación concoidea característica y, en el primer tramo, está bastante carbonatada, apareciendo pátinas de color blanco.
9. 10,4-12,1 m: arena arcillosa de color verdoso (clSa), siendo los cantos de arena de cuarzo y feldespato potásico. Contacto neto con el tramo superior.
10. 12,1-12,25 m: arcilla-limosa (siCl) de color verde oscuro.
11. 12,25-12,55 m: arena gruesa con matriz arcillosa (clCSa).
12. 12,55-17,55 m: arcilla limosa (siCl) de color verde y fractura concoidea. Destaca la presencia de zonas con pátinas de color negro atribuibles a óxidos de manganeso. También en este tramo aparecen procesos de carbonatación.
13. 17,55-18,7 m: arcillas y arenas (Cl/Sa) de color verde pistacho, con cantos de cuarzo y feldespato potásico. Se inicia con un nivel de apenas 5 cm de gravas gruesas (20 mm). La plasticidad es alta y destaca la presencia ocasional de algún nivel de gravas gruesas (CGr) de unos 5 cm de espesor y con tamaño de cantos de 40 mm.
14. 18,7-21,6 m: arenas arcillosas (clSa). Al igual que en el tramo anterior, al inicio hay unos 5 cm de gravas. También destaca la presencia de una pasada de guijarros (50-100 mm) de cuarzo y cuarcita con arcilla. En el último metro los cantos de grava forman estratificaciones cruzadas. El color de este tramo es rojizo.
15. 21,6-21,9 m: arena gruesa con gravas (grCSa) presentando alineación de cantos formando estratificación cruzada.
16. 21,9-23,4 m: arena media con arcillas (clCSa), disminuyen ligeramente los tamaños a mitad de tramo pasando finalmente a un tramo granocreciente de arena gruesas con arcilla (clGSa). Color rojizo.
17. 23,4-24,2 m: arenas con cantos de grava gruesa (clcgrCSa) que alcanzan los 70 mm de diámetro y algo de matriz arcillosa. Su color es rojizo y los cantos son de cuarzo, cuarcita y feldespato potásico.
18. 24,2-25,35 m: arena media con arcillas (clMSa), muy similares a las del tramo 16, presentando también los mismos tonos rojizos.
19. 25,35-25,5 m: gravas gruesas (CGr) con cantos que llegan a alcanzar un diámetro de 80 mm.
20. 25,5-27,1 m: arena media arcillosa (clMSa), igual que los tramos 16 y 18.
21. 27,1-28,6 m: arcilla (Cl) verdosa de alta plasticidad, con algún canto ocasional de cuarzo de 1-2 mm de diámetro. Son abundan-

tes las carbonataciones y los tonos rojizos. En sus últimos 10 cm experimenta un aumento de cantos a tamaño arena.

22. 28,6 m. Contacto erosivo entre la unidad de arcosas y la Unidad Basal de la Serie Roja. Ésta es en su base un conglomerado clastoso-portado con cantos de cuarcita y pizarras en una matriz arenosa. El tamaño de los cantos llega a alcanzar los 300 mm.

A modo de resumen, la Unidad TL Arcosas del Teso Grande se dispone sobre el último tramo rocoso de la Formación Areniscas de Salamanca. En sus primeros diez metros está formada por secuencias granodecrecientes que comienzan con niveles conglomeráticos (30 cm), que pasan a arenas arcillosas y/o arcillas arenosas. A mitad de la columna destaca la presencia de un banco arcilloso de cinco metros de potencia de color verde y fractura concoidea. En el último tramo hay secuencias de arenas arcillosas con intercalaciones de gravas, que suelen presentar estructuras de flujo de tipo estratificación cruzada. Destacar como rasgo general la presencia de pátinas de óxidos de Mn en los niveles más finos de la columna, así como la fractura de tipo concoidea que se produce en los mismos.

Propiedades geotécnicas

Los estudios de caracterización geotécnica requieren la realización de numerosos ensayos de naturaleza diversa, que permitan valorar las diferentes propiedades que condicionan el comportamiento geomecánico de un material: mineralogía, granulometría, plasticidad, densidad, resistencia, etc. Para ello se recogieron 25 muestras, de acuerdo con las recomendaciones dadas por la UNESCO/IAEG (1976) para definir unidades geotécnicas.

La parte de experimentación consistió en la realización de los ensayos de identificación (granulometrías y determinación de los límites líquido y plástico), determinación de las propiedades físicas (densidad aparente, peso específico, porosidad, grado de saturación, humedad), consolidación, hinchamiento y obtención de los parámetros resistentes (resistencia al corte y resistencia a compresión simple), todos realizados según la normativa vigente (AENOR, 2002). Finalmente, para estudiar la mineralogía se hicieron análisis de difracción de rayos X. Todos los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Geotecnia y en el Servicio de Difracción de rayos X de la Universidad de Salamanca.

El objetivo final de este apartado es por tanto establecer unos valores de referencia para cada una de las propiedades geotécnicas de la Unidad TL Arcosas del Teso Grande.

Descripción de campo

Durante el trabajo de campo, las muestras recogidas fueron descritas de acuerdo con la norma UNE-EN ISO

14688-1 (Tabla 2). El uso de esta normativa reduce el grado de subjetividad que cada observador pueda introducir, asegurando además el empleo de una terminología estándar.

Dieciséis de las muestras pertenecían a tramos granulares, siendo descritas en campo como arenas o gravas gruesas (CSa o FGr), con fracciones secundarias de arena media (msa), limo (si), grava media (mgr) y

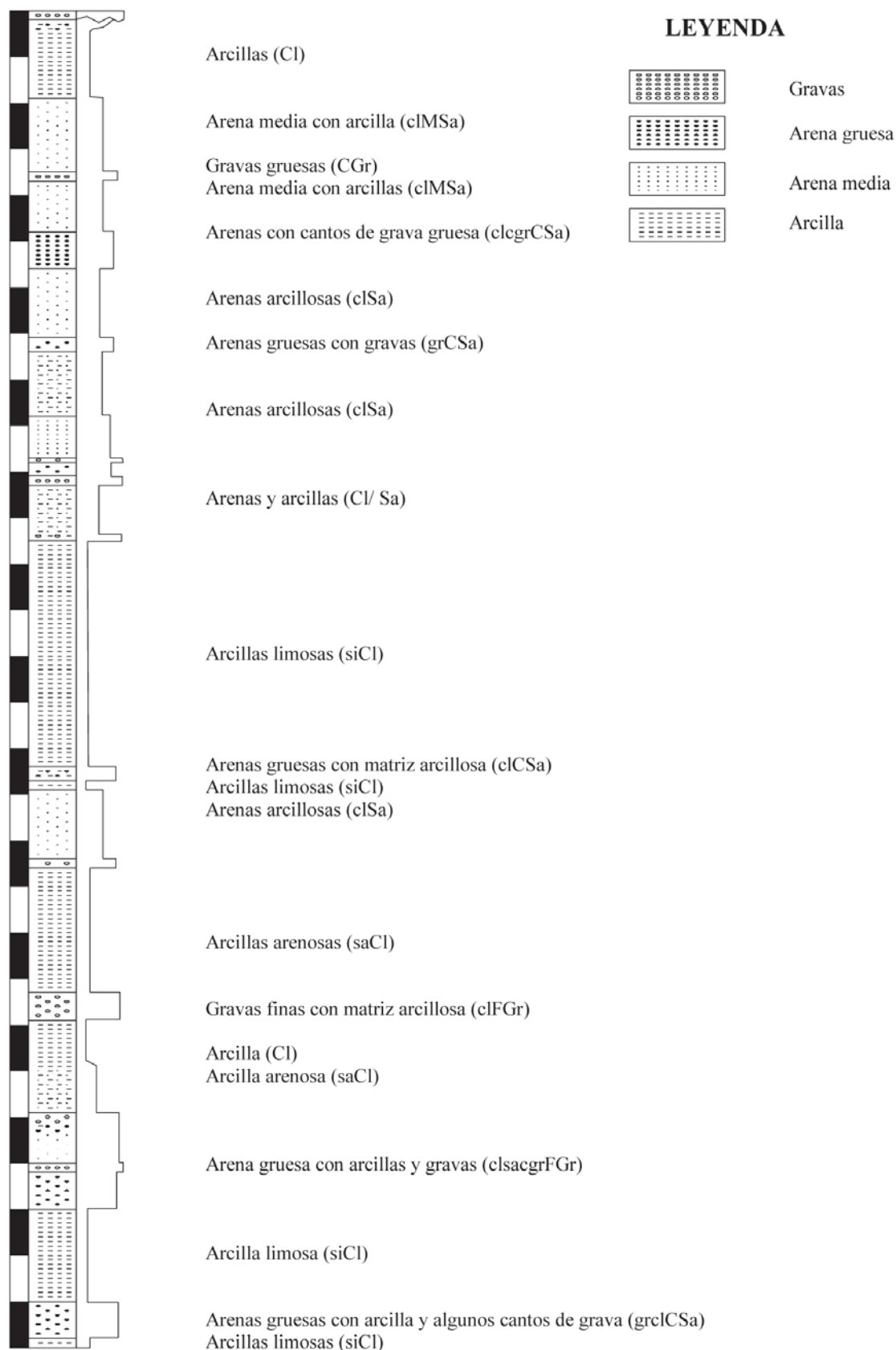


Figura 3.- Columna tipo «Arcosas del Teso Grande», en el talud de la carretera N-620, p.k. 238+500.

arena fina (fsa) variables en importancia. Son por tanto suelos naturales gruesos tipo arena con grava, de color verde pistacho si se encuentran frescos. Presentan cantos de cuarzo y feldespato, subangulosos y de alta esfericidad, pudiendo aparecer ocasionalmente algún fragmento cementado. Su resistencia en seco es baja o media, y la plasticidad variable en función de la cantidad de finos. Reaccionan al entrar en contacto con ácido clorhídrico, pero sólo en el caso de tratarse de una muestra procedente de zonas afectadas por procesos de encostramientos carbonatados.

De los tramos cohesivos se tomaron nueve muestras ya que, debido a su homogeneidad, se consideró que esta cantidad resultaba suficiente para estudiar sus propiedades geotécnicas. Se trata de materiales arcillosos (CI), con fracciones secundarias de limo (si) y, mucho menos abundantes, de arena (sa). Son por tanto suelos naturales finos tipo arcilla, a veces algo limosos o arenosos, y de color verde pistacho a verde oscuro. Presentan plasticidad media-alta y consistencia variable, dependiendo en gran medida de la humedad de cada muestra. La resistencia en seco es alta, y no dan reacción al ataque con ácido clorhídrico, salvo que estén afectadas por algún encostramiento carbonatado (lo que ocurre ocasionalmente a pocos metros de la superficie).

Ensayos de identificación: granulometría y límites de Atterberg

Los ensayos granulométricos y de determinación de los límites líquido y plástico, se emplean para definir de una manera objetiva y rápida la plasticidad y granulometría de los suelos, propiedades que juegan un papel fundamental en su comportamiento y en las que se basa la principal clasificación de suelos, la USCS (*Unified Soils Classification System*), que engloba en grandes grupos suelos con comportamientos geotécnicos similares.

En la figura 4 se representan los datos granulométricos y de plasticidad obtenidos para la Unidad TL Arcosas del Teso Grande.

Algunas de las clasificaciones empleadas en mecánica de suelos consideran una división entre suelos con un contenido en finos superior al 35%, y suelos con contenido en finos inferior al 35%. Los primeros reciben el nombre de finos y los segundos de granulares (Craig, 2004). Las granulometrías realizadas en este trabajo reflejan que ambos grupos están presentes dentro de la Unidad TL Arcosas del Teso Grande.

En el gráfico de Casagrande, relacionado con la plasticidad de los suelos, no se apreció ninguna

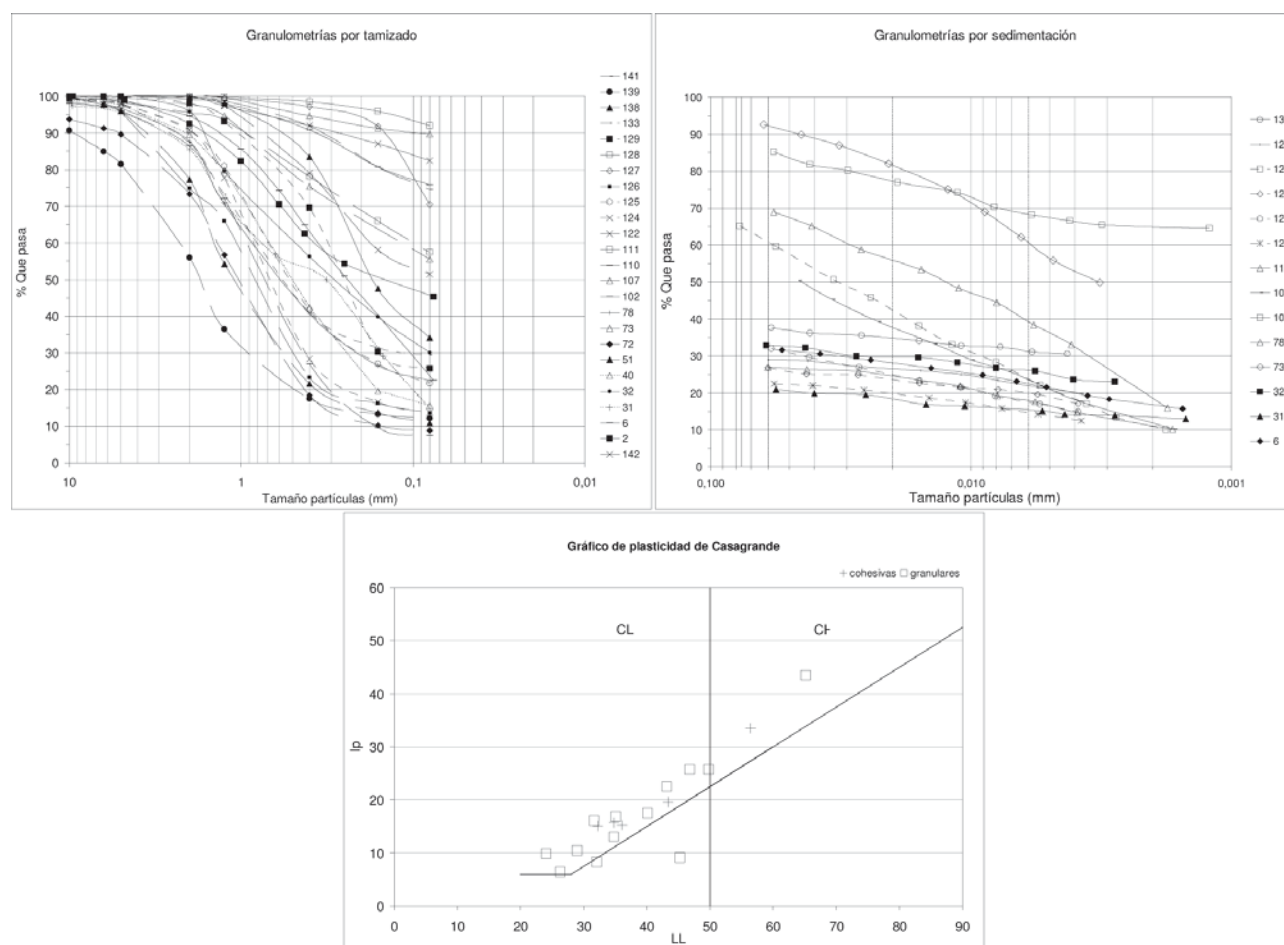


Figura 4.- Curvas granulométricas de las arcosas del Teso Grande (tamizado y sedimentación) y gráfico de Casagrande para los materiales granulares y cohesivos.

diferencia entre las muestras granulares y las cohesivas, estando la mayoría incluidas dentro del dominio CL, arcillas de baja plasticidad.

Al aplicar la clasificación de suelos USCS las muestras quedaron incluidas mayoritariamente bien en los grupos de las arenas o bien en el de las arcillas de plasticidad baja a media (CL) (Tabla 3). En el primer caso, las muestras se caracterizan por su carácter granular, siendo arenas bien graduadas o arenas limosas, con una fracción arenosa mayoritaria (67%) y contenidos apreciables de finos y gravas (19% y 14%). El límite

líquido (LL) medio obtenido fue de 39, y el índice de plasticidad (IP) de 18, valores que se corresponden con una plasticidad moderada (IAEG, 1981) (Tabla 3a). Las muestras del segundo grupo presentaron valores propios de materiales cohesivos tipo CL, estando su fracción mayoritaria formada por finos (72%), acompañadas de arenas (27%). Ocasionalmente pueden aparecer cantos de tamaño grava, pero siempre en contenidos inferiores al 4% (Tabla 3b). El LL medio es de 43 y el IP es de 18, por lo que resultan materiales de plasticidad intermedia (IAEG, *op cit.*).

Id	W (%)	>20mm	20 a 2mm	2 a 0,08mm	<0,08mm	LL	LP	Ip	Ic	II	USCS
6	18,9	0	5,5	72	22,6	32,1	23,9	8,2	1,6	-0,6	SM
31		1,2	13,1	70,9	14,8	25,6	14,4	11,2			SC
32		0	4,2	73,2	22,6	24,1	14,3	9,8			SC
40	7	0	10,4	74,1	15,6	23,3	15,2	8,1			SC
42	10,8	0	0	67,9	32,1						
51		0	22,8	66,4	10,9						SP-SM
72		3,1	23,6	64,5	8,9	31,7	15,7	16	1,9	-0,9	SW-SC
78		0	12,4	65,2	22,5	35,1	18,3	16,8	1,8	-0,8	SC
110	14,5	0	13,6	78,9	7,5	45,3	36,2	9,1	3,4	-2,4	SW-SM
124	9	0	9,1	77,2	13,7	40,1	22,6	17,5	1,8	-0,8	SC
125	13,3	0	9,3	69	21,7	49,8	28,5	25,7	1,4	-0,6	SM
126	12,4	0	25,2	61,2	13,6	46,8	21,1	25,7	1,3	-0,3	SC
129	10,3	0	1,9	72,4	25,7	26,3	19,9	6,4	2,5	-1,5	SC-SM
133	9,9	0	12,8	57,8	29,4	43,2	20,7	22,5	1,5	-0,5	SC
138	12,8	0	0,4	65,4	34,1	29	18,6	10,4	1,6	-0,6	SC
139	8,7	5,1	39	43,8	12,1	65,2	21,7	43,5	1,3	-0,3	SC
Media	12	1	13	67	19	39	22	18	1,8	-0,8	
Máx	19	5	39	79	34	65	36	44	3,4	-0,3	
min	7	0	0	44	8	24	14	6	1,3	-2,4	

Id	W (%)	>20mm	20 a 2mm	2 a 0,08mm	<0,08mm	LL	LP	Ip	Ic	II	USCS
73		0	0	10,4	89,6	56,4	33,5	22,9			MH
102	20	0	0,82	23,4	75,8	54,4					
107	22,6	0	2,24	42,3	55,5	36,1	20,9	15,2	0,89	0,11	CL
111	15,6	0	4,51	38,1	57,4						
122	12,4	0	0,44	48,2	51,4	34,8	19,1	15,7	1,43	-0,43	CL
127	16,4	0	0	29,5	70,5	32,2	17,1	15,1	1,05	-0,05	CL
128	15,4	0	0	8,1	91,9	43,4	23,8	19,6	1,43	-0,43	CL
141	14,86	0	0,33	25,2	74,5						
142	15,14	0	0,04	17,6	82,4						
Media	16,6	0	0,9	27	72	43	23	18	1,2	-0,2	
Máx	22,6	0	4,51	48,2	91,9	56,4	33,5	22,9	1,43	0,11	
min	12,4	0	0	8,1	51,4	32,2	17,1	15,1	0,89	-0,43	

Tabla 3.- Granulometría y límites de Atterberg de los materiales granulares (superior) y de los materiales cohesivos (inferior). Id: identificador de muestra. W (%): porcentaje de humedad. >20 mm: partículas con tamaños mayores de 20 mm. 20 a 2 mm: partículas con tamaños comprendidos entre 20 y 2 mm. 2 a 0,08 mm: partículas con tamaños comprendidos entre 2 y 0,08 mm. <0,08 mm: partículas con tamaños inferiores a 0,08 mm. LL: límite líquido. LP: límite plástico. IP: índice de plasticidad. Ic: índice de consistencia. II: índice de fluidez. USCS: grupos del sistema unificado de clasificación de suelos.

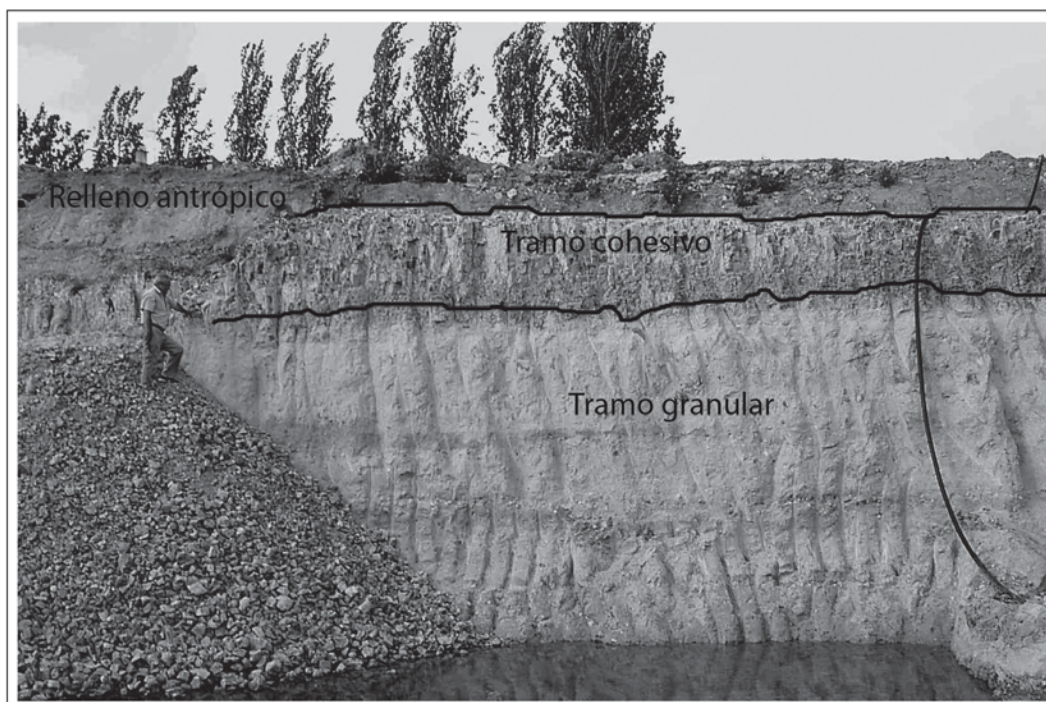


Figura 5.- Tramo granular y tramo cohesivo en la Unidad TL Arcosas del Teso Grande (excavación para cimientos de un nuevo edificio).

Por lo tanto, los ensayos de identificación y clasificación de los suelos han permitido establecer dos unidades TG dentro de la Unidad TL Arcosas del Teso Grande: una correspondiente a los tramos granulares, con porcentaje de finos inferior 35%, y otra correspondiente a los tramos cohesivos (finos > 35%) (Fig. 5).

Mineralogía

La determinación de la composición mineralógica se realizó a partir de los análisis de difracción de rayos X de cuatro muestras, dos de cada una de las unidades TG diferenciadas en los ensayos de identificación previamente descritos. De cada una de las muestras se obtuvieron los difractogramas de roca total, agregado orientado, muestra glicolada y muestra calcinada, pudiendo de este modo establecer una identificación y semicuantificación de la mineralogía. En la tabla 4 se presentan los resultados.

Las muestras granulares se caracterizaron por tener al cuarzo como mineral mayoritario, mientras que su contenido en filosilicatos (esmeclitas e illitas y, en menor proporción, caolinita) resultó ser inferior al 35%. Por su parte, en las muestras cohesivas los filosilicatos (de nuevo esmeclitas, illitas y caolinitas), fueron los minerales más abundantes. Por último, en una de las muestras cohesivas analizadas se detectó una cantidad apreciable de clorita.

A partir de los ensayos de plasticidad, y habiendo obtenido el porcentaje de partículas arcillosas, se procedió a calcular la actividad, parámetro definido como la relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje de la fracción arcillosa (porcentaje en peso

menor de 2 mm) (Skempton, 1953). En las dos muestras granulares los valores obtenidos fueron de 0,5 y 0,48; mientras que para las muestras cohesivas resultaron ser inferiores, 0,3-0,2. En ambos casos por tanto la fracción arcillosa resultó ser inactiva.

Muestra	72	78	73	127
	Granulares		Cohesivas	
Cuarzo	54	53	24	27
Feldespato	4	4	0	0
Plagioclasas	10	10	5	2
Esmeclita	12	25	28	58
Illita	17	7	21	10
Caolinita	3	3	6	3
Clorita	0	0	16	0

Tabla 4.- Semicuantificación de la mineralogía de las Arcosas del Teso Grande a partir de análisis de difracción de rayos X.

Propiedades físicas

La humedad natural, la densidad relativa de las partículas sólidas y la densidad aparente y seca fueron evaluadas de acuerdo con la normativa vigente para ensayos geotécnicos en suelos. Con los datos obtenidos se pudo obtener a su vez tanto el índice de poros como el grado de saturación (Tabla 5).

La naturaleza de esta unidad y el procedimiento a seguir en los ensayos de laboratorio desaconsejaron la utilización de éstos para valorar la permeabilidad, que finalmente fue estimada a través de dos métodos aproximados. El primero de ellos, basado en la fórmula

de Hazen, $k \text{ (cm/s)} = 100 \times D_{10}^2$ (Jiménez Salas y Justo Alpañes, 1975), emplea como dato de partida el tamaño del cernido del tamiz que deja pasar únicamente el diez por ciento de la muestra. El segundo método estima el coeficiente de permeabilidad en función del grupo al que pertenezca cada muestra dentro de la clasificación USCS (González de Vallejo *et al.*, 2002). El coeficiente de permeabilidad estimado para la subunidad granular se situó entre 10^{-4} - 10^{-3} cm/s en base a su pertenencia al grupo SC (si es SW, 10^{-3} -0,1), o entre 10^{-2} y 10^{-3} cm/s cuando se aplicó la fórmula de Hazen. Para la subunidad cohesiva, el coeficiente de permeabilidad estimado resultó ser netamente inferior: $< 4 \times 10^{-6}$ cm/s al aplicar la fórmula de Hazen, y entre 10^{-5} y 10^{-8} cm/s al emplear

las estimaciones a partir de a la clasificación USCS. Ambos métodos dan resultados similares y coherentes con la naturaleza composicional del suelo.

La humedad natural de las muestras granulares varió entre 7% y 18,9%, mientras que en las muestras cohesivas los valores fueron algo más altos, entre 12,4% y 22,6%, dado que el mayor porcentaje de minerales arcillosos permite retener mucha más agua que en las muestras granulares.

La densidad relativa de las partículas sólidas mostró valores similares en ambos grupos: 2,61 para las muestras granulares y 2,58 para las cohesivas, observándose sin embargo diferencias en los valores medios de densidad aparente: 2 Mgr/m³ para las granulares y 2,12 Mgr/m³

Id	Gs	ρ_{ap}	ρ_{dry}	Sr (%)	e	D ₁₀	k (Hazen, cm/s)	k (USCS, cm/s)
2	2,6	1,99	1,69	90	0,539	<0,02	4,0E-04	
6	2,59	2,05	1,72	97	0,506	<0,0015	2,3E-06	1×10^{-3}
31	2,6	1,96	1,87	31	0,39	0,001	1,0E-06	
32	2,52	2,13	2,07	33	0,217	<0,003	9,0E-06	1×10^{-4}
51			1,72			0,08	6,4E-03	
72	2,66					0,25	6,3E-02	1×10^{-3}
78						0,002	4,0E-06	1×10^{-4}
110	2,61					0,17	2,9E-02	
124	2,73					0,004	1,6E-03	1×10^{-4}
125	2,63					<0,004	1,6E-05	1×10^{-3}
126	2,6					<0,004	1,6E-05	1×10^{-4}
129	2,59	2,17	1,97	85	0,31	<0,004	1,6E-05	$1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$
133	2,64	2,00	1,82	58	0,45	<0,004	1,6E-05	1×10^{-4}
138	2,58	2,20	1,95	100	0,32			1×10^{-4}
139	2,6							1×10^{-4}
Media	2,61	2,07	1,85	71	0,39		7,7E-03	
Máx	2,73	2,20	2,07	100	0,54			
min	2,52	1,96	1,69	31	0,22			

(a)

Id	Gs	ρ_{ap}	ρ_{dry}	Sr (%)	e	D ₁₀	k (Hazen, cm/s)	k (USCS, cm/s)
73			2,04			<0,003	9,0E-06	
102						<0,0012	1,4E-06	
107	2,57	2,32	1,89		0,36	<0,004	1,6E-05	$10^{-5} - 10^{-8}$
111	2,52	2,35	2,03		0,24	<0,002	4,0E-06	
122	2,64	2,24	1,99		0,33	<0,002	4,0E-06	$10^{-5} - 10^{-8}$
127	2,4					0,002	4,0E-06	$10^{-5} - 10^{-8}$
128	2,76	2,40	2,08		0,33			$10^{-5} - 10^{-8}$
141		2,10	1,83					
142		2,14	1,86	86	0,49			
Media	2,58	2,26	1,96	84	0,32		6,4E-06	
Máx	2,76	2,40	2,08	86	0,51			
min	2,4	2,10	1,83	81	0,24			

Tabla 5.- Propiedades físicas (A) de la unidad TG granular y (B) de la unidad TG cohesiva. Id: identificador de muestra. (Gs) densidad relativa de las partículas sólidas, (ρ_{ap}) densidad aparente, en Mg/m³, (ρ_{dry}) densidad seca, en Mg/m³, (e) índice de poros, (Sr) grado de saturación, (D₁₀) diámetro eficaz, en mm., (k) coeficiente de permeabilidad.

para las cohesivas. El índice de poros es elevado en ambos TG y no hay apenas diferencia entre ellos.

El grado de saturación se calculó aplicando la siguiente fórmula (Craig, 2004):

$$Sr(\%) = 100 \times [(w \times G_s) \div e],$$

donde Sr es el grado de saturación, w la humedad, G_s la densidad relativa de las partículas sólidas y e , el índice de poros.

Para las muestras granulares el grado de saturación obtenido fue del 71%, mientras que en las cohesivas fue del 84%, lo que explica claramente la diferencia de densidad aparente en estos materiales, ya que si bien el volumen de huecos se puede considerar igual para las dos unidades, el hecho de que las cohesivas contengan más agua en ellos se traduce en unos valores de densidad aparente mayores.

Hinchamiento

Los cambios de volumen que experimentan algunos suelos debido a la presencia de arcillas expansivas pueden ocasionar problemas en diversas obras civiles (edificios, carreteras,...). Los ensayos Lambe se emplean para hacer una primera valoración cualitativa del potencial de hinchamiento de un suelo (Lambe, 1960). Para ello se compacta en un anillo la muestra a ensayar y posteriormente se satura. Sobre la muestra se coloca un anillo dinamométrico junto con un comparador, de modo que, en caso de que la muestra hinche al saturarse, se pueda medir la fuerza que está ejerciendo sobre el anillo. Las muestras de la Unidad TL Arcosas del Teso Grande se han compactado secas, es decir, con la humedad que resulta de mantenerlas durante 48 horas en un ambiente con una humedad relativa del 50%.

Con las muestras granulares se hicieron ocho ensayos, mostrando resultados en el campo del potencial de hinchamiento *no crítico* (Fig. 6). Este comportamiento se debe probablemente a que las arcillas presentes en estas muestras son poco expansivas, como indican sus valores de LL e IP (Tabla 3). Además, durante la compactación de las muestras granulares el importante contenido en partículas de tamaño arena hace que los contactos entre cantos favorezcan la formación de una estructura porosa. Así, al inundar el dispositivo de ensayo, los pocos minerales arcillosos encuentran rápidamente poros donde expandirse sin necesidad de variar el volumen de la muestra.

Sin embargo, en las muestras cohesivas los ensayos realizados reflejaron un comportamiento más expansivo (dos con potencial *crítico*, dos con *marginal* y tres con *no crítico*). En este caso, al ser la fracción arena más escasa, la estructura adquirida por la muestra al ser compactada resulta menos porosa. Los minerales arcillosos al ser más abundantes y expandirse incrementan el volumen del suelo en la única dirección deformable del dispositivo de ensayo, la vertical, donde por medio del anillo dinamométrico se mide la presión que ejercen.

Dado que la presión obtenida en el ensayo Lambe es sólo cualitativa, se decidió hacer con las muestras de los tramos cohesivos ensayos de presión de hinchamiento en edómetro, que sí tienen ya un carácter cuantitativo. Las presiones obtenidas, entre 0,11 y 0,06 MPa, corresponden a una expansividad entre baja y media (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Comportamiento frente a la consolidación

Se define la consolidación de un suelo como el proceso de disipación de excesos de presiones

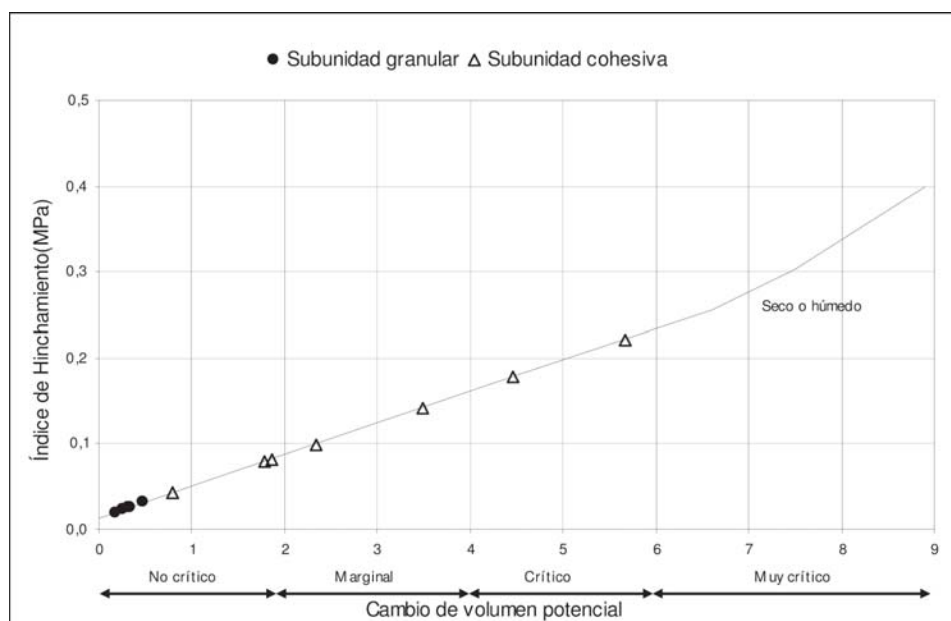


Figura 6.- Resultados de la determinación de la expansividad en el aparato Lambe.

intersticiales del mismo generado por una aplicación de carga (Powrie, 2005). En materiales granulares este proceso se considera instantáneo, dado que su alta permeabilidad hace que la migración de agua se produzca de manera rápida y que los asientos diferidos no sean significativos. Sin embargo, en muestras cohesivas los asientos diferidos pueden ser importantes, con el consiguiente riesgo para las estructuras que sobre ellos se dispongan. Controlar la velocidad y magnitud de este proceso resulta por tanto de gran interés en la unidad TG cohesiva. Se hicieron dos ensayos normalizados de consolidación unidimensional (Fig. 7) en esta unidad.

Los valores del índice de compresión (C_c) determinados en ambas curvas edométricas se presentan en la tabla 6, y corresponden a suelos con una compresibilidad media (Bell, 2000). En la misma tabla

Muestra	141	142
C_c	0,12594	0,1066
m_v (m ² /MN)	0,0311	0.0299

Tabla 6.- Resumen de los datos obtenidos en los ensayos edométricos de la subunidad cohesiva.

también se presenta el valor del índice de compresibilidad volumétrico (m_v) de ambos ensayos.

Para estudiar la historia tensional de la Unidad TL Arcosas del Teso Grande se aplicaron a las curvas edométricas las correcciones de Schmertmann (1955), obteniéndose presiones de sobreconsolidación de 0,2 y 0,5 MPa. Son valores muy bajos y parecen inferiores a las que a tenor de la historia geológica soportaron estos

materiales. Las causas de esta desviación son achacables a los procesos de desecación y/o formación de costras carbonatadas, que enmascaran la verdadera historia tensional de los suelos, haciendo muy difícil estimar por medio de curvas edométricas su presión de preconsolidación (Jiménez Salas y Justo Alpañes, 1975). Pese a todo, la morfología de las curvas edométricas, relativamente horizontales en su tramo inicial y verticalizadas a partir de una presión de 0,1 MPa, permitieron situar la frontera entre las tensiones que provocan asientos importantes y las que no en 0,1 MPa.

Resistencia a compresión simple y resistencia al corte.

Las muestras pertenecientes a la unidad TG granular, con nula cohesión entre sus partículas, no pudieron someterse a ensayos de compresión simple, habiéndose evaluado únicamente sus parámetros de resistencia por medio del ensayo de resistencia al corte directo. Por el contrario, en la unidad TG cohesiva ambos ensayos sí que pudieron realizarse.

Se hicieron ensayos de corte directo tipo CD (consolidado, drenado), obteniendo de este modo los parámetros efectivos. Para su ejecución se empleó muestra procedente de un sondeo realizado en la zona centro de la ciudad (C/Grillo) y cedido para este estudio por la empresa Geoduro S.L. El testigo seleccionado fue tallado hasta un diámetro de 50 mm y una altura de 24 mm. Para asegurar que las probetas rompiesen bajo unas condiciones drenadas se seleccionó una velocidad de corte de 0,007mm/min para las muestras granulares, y de 0,001mm/min para las muestras cohesivas, velocidades que están dentro de los límites

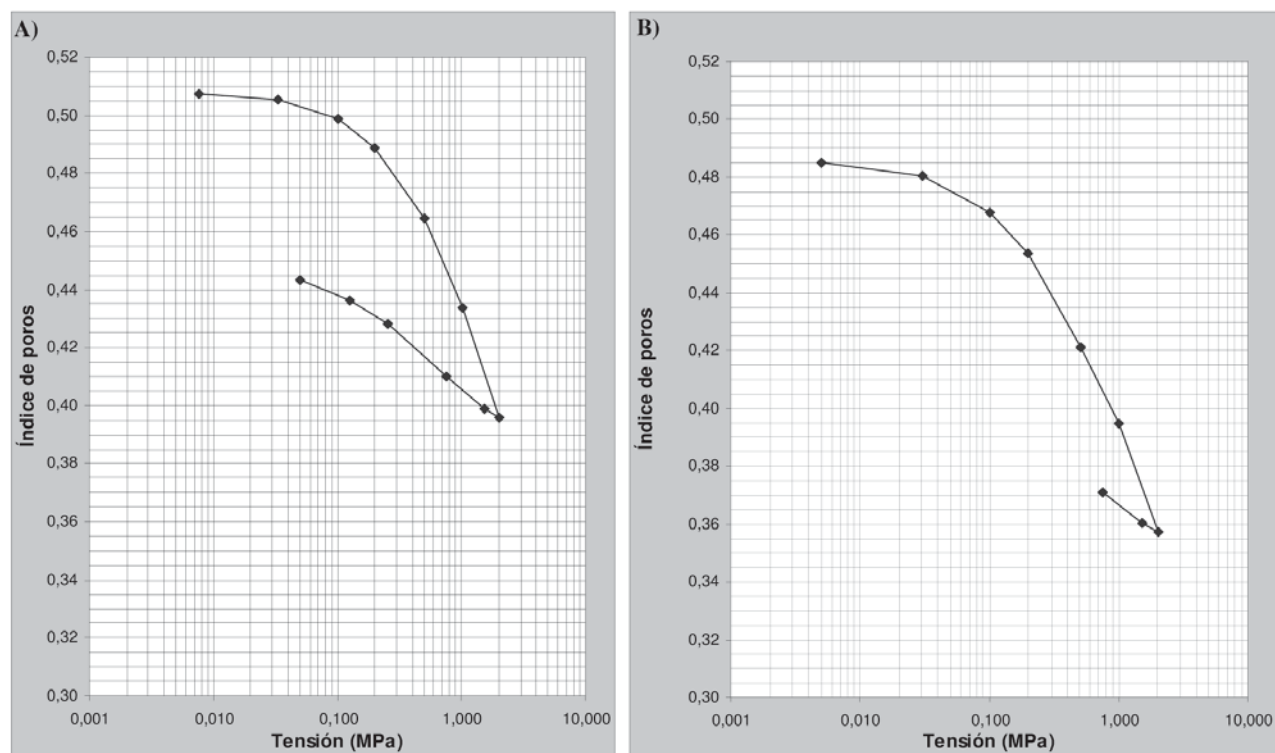


Figura 7.- Curvas edométricas de los materiales de la unidad TG cohesiva (A) muestra 141 y (B) muestra 142.

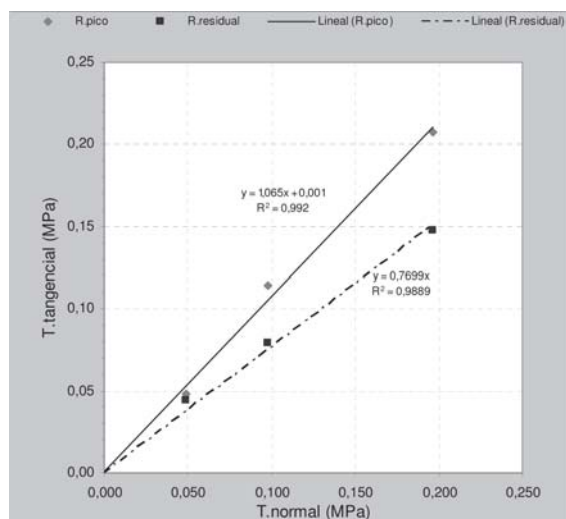


Figura 8.- Resistencia al corte de los materiales granulares.



Figura 9.- Taludes excavados en los materiales de la unidad TG granular.

recomendados para suelos granulares y cohesivos respectivamente (Powrie, 2005). También se obtuvieron los valores de resistencia residual, para lo que tras cada corte se cizalló la muestra manualmente tres veces más, repitiendo a continuación el ensayo según las velocidades anteriormente mencionadas.

Resistencia al corte directo, tipo CD. En la figura 8 se representan las rectas que definen el comportamiento de pico y el residual de la unidad TG granular. El ángulo de rozamiento de pico (ϕ') obtenido es elevado (47°), mientras que disminuye en condiciones residuales hasta 38° . En ambos casos el carácter granular de esta unidad se ve reafirmado por la nula cohesión que presenta, al pasar la recta de resistencia intrínseca por el origen de coordenadas. Estos datos son coherentes con lo observado en taludes excavados en esta unidad, con una inclinación de 45° (1/1) y sin signos de inestabilidad (Fig. 9).

La obtención de las rectas de resistencia de los tramos cohesivos ha sido compleja, habiendo sido necesario el tallado y corte de hasta ocho pastillas. Los resultados no presentan una distribución lineal esfuerzo normal-esfuerzo tangencial debido a la presencia de superficies de debilidad, *slickensides*, que en algunas pastillas disminuyeron la tensión tangencial máxima alcanzada en el ensayo. Sería necesario hacer un estudio más detallado de la distribución, abundancia e importancia de estas superficies de debilidad en la resistencia mecánica de los tramos cohesivos. En este trabajo, con el fin de obtener unos datos preliminares de resistencia, únicamente se ha estudiado el comportamiento mecánico de muestras que no presentaban *slickensides*. Así, en la figura 10 se representan las líneas de resistencia de esta subunidad construidas únicamente a partir de aquellos datos provenientes de pastillas en las que el fallo no se produjo a través de planos de debilidad previos. Los parámetros de pico obtenidos fueron $\phi' = 43^\circ$, y $c' = 0,07$ MPa, mientras que como parámetro residual $\phi_r' = 19^\circ$. Como era

de esperar, y a diferencia de lo que ocurre en la subunidad granular, la cohesión no es nula y sí que aporta resistencia a este tipo de suelos.

Resistencia a compresión simple. Como se señaló anteriormente, únicamente se ha realizado este ensayo en muestras cohesivas, de modo que la resistencia de pico obtenida fue de 1 MPa, valor elevado para un suelo.

Ensayos «in situ»: penetración dinámica y medida de velocidad de propagación de ondas P.

Se comentan en este apartado los resultados de los ensayos de penetración dinámica tipo SPT (*standard penetration test*) procedentes de la revisión de diversos informes geotécnicos cedidos por organismos públicos.

En los doce ensayos SPT incluidos en los informes revisados, los tramos granulares dieron en todos los casos rechazo, por lo que únicamente se puede concluir que se trata de materiales de elevada compacidad, no siendo posible estimar su ángulo de rozamiento interno.

Para los tramos cohesivos el número de datos de partida es inferior, cuatro, y de ellos dos han dado rechazo, mientras que los otros dos dan un N_{SPT} de 74. En terrenos cohesivos se puede hacer una estimación de la resistencia a compresión simple a partir de la fórmula empírica: q_u (MPa) = $N_{SPT}/80$ (Suriol Castellví *et al.*, 1995); que proporciona para los tramos cohesivos valores de 0,925 MPa, semejantes a los obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión simple en laboratorio.

Asimismo, se realizaron medidas de velocidad de propagación de ondas P, valor empleado comúnmente para estimar la ripabilidad de los distintos materiales y poder así establecer el método de excavación más conveniente. Para ello se buscaron emplazamientos en los que las arcosas se situasen próximas a la superficie, facilitando de este modo la interpretación de las dromocronas obtenidas. El procedimiento operativo consistió en la realización de un primer disparo con un

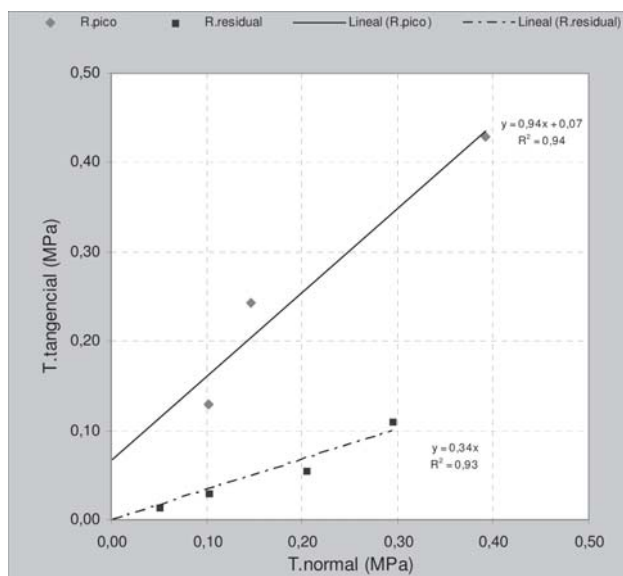


Figura 10.- Resistencia al corte de los materiales de la unidad TG cohesiva.

espaciado de geófonos de un metro, de modo que la velocidad de la onda directa se pudiese obtener de manera clara. A continuación el espaciado se aumentaba a cinco metros y se realizaba el segundo disparo.

Las Arcosas del Teso Grande presentan una velocidad de propagación baja: 667-606 m/s para los tramos granulares y 800 m/s para los cohesivos. Como era de esperar, dadas las características propias de un suelo de esta unidad, la ripabilidad de estos materiales es sencilla y no requiere el empleo de métodos de excavación especiales.

Conclusiones

En el entorno urbano de la ciudad de Salamanca, entre las formaciones de naturaleza rocosa Areniscas de Salamanca y Areniscas de Cabrerizos (a techo y muro respectivamente), se disponen unos materiales con características propias de suelos y con entidad de unidad litológica al presentar características suficientemente

Propiedad o parámetro	TG granular	TG cohesiva
gravas (%)	14	1
arenas (%)	67	27
finos (%)	19	72
mineralogía	cuarzo, feldespato, moscovita, montmorillonita, palygorskita	cuarzo, feldespato, montmorillonita, palygorskita
límite líquido	39	43
índice de plasticidad	18	18
USCS	SC, SM, SP, SW	CL y MH
actividad	0.48-0.5	0.32-0.2
w (%)	12	17
Gs	2.61	2.58
ρ_{ap} (Mg/m ³)	2.07	2,04
ρ_{dry} (Mg/m ³)	1.85	1.96
e	0.39	0.32
Sr (%)	71	84
σ_c (MPa)	-	1
C' (MPa)	0	
φ'	47	43
φ_r'	38	19
k (cm/s)	$7,7 \times 10^{-3}$	$6,4 \times 10^{-6}$
Lambe	No Crítica	Marginal-Crítico
Presión hinch (MPa)	-	0.11-0.06
Cc	-	0.116270
m_v (m ² /MN)	-	0.0305
Vp (m/s)	667-606	800

Tabla 7.- Resumen de las propiedades geotécnicas de las Arcosas del Teso Grande.

homogéneas y marcadamente diferentes al resto de materiales de su entorno. A esta unidad se le ha asignado el nombre de Arcosas del Teso Grande.

La columna tipo está formada inicialmente por secuencias granodecrecientes que comienzan con niveles conglomeráticos que pronto pasan a arenas arcillosas y/o arcillas arenosas, apareciendo a mitad de la columna un banco arcilloso de cinco metros de potencia de color verde y fractura concoide, muy característico. En el tramo final se localizan secuencias de arenas arcillosas con intercalaciones de gravas y arcillas que suelen presentar estructuras de flujo de tipo estratificación cruzada. A techo se dispone o bien la Formación Areniscas de Cabrerizos o bien, a través de una discordancia erosiva, un conglomerado arenoso con cantos de tamaño «piedra» (300 mm) y color rojizo que marca el inicio de la Unidad Basal de la Serie Roja.

En este trabajo se han obtenido las principales propiedades y parámetros geotécnicos de la unidad tipo litológica (TL) Arcosas del Teso Grande (Tabla 7), dividida a su vez en dos subunidades tipo geotécnicas (TG): una granular y otra cohesiva, de acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos granulométricos. La coincidencia entre los resultados granulométricos y las descripciones de campo facilita la identificación de ambas desde un primer momento, de modo que la planificación de las posteriores investigaciones necesarias se puede realizar desde la fase inicial.

Dentro de la clasificación USCS, la subunidad cohesiva pertenece al dominio de los suelos tipo CL, es decir, arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, con una fracción secundaria variable de arenas. La subunidad granular por su parte está formada por suelos de tipo arena: arenas limosas mezclas de arena y limo o arenas arcillosas mezclas de arena y arcilla.

La humedad natural es siempre inferior a la humedad correspondiente al límite plástico, de modo que el índice de fluidez (I_L) va a ser siempre negativo.

La mineralogía en ambas subunidades es similar: cuarzo, feldespatos, plagioclasas y filosilicatos (esmeclitas, illitas, caolinitas y, ocasionalmente, cloritas). El diferente contenido en filosilicatos condiciona el distinto comportamiento geotécnico de cada una de ellas, siendo superior al 50% en el caso de los tramos cohesivos. Sin embargo, al estar formada la fracción arcillosa de ambos grupos por los mismos minerales, las diferencias entre los valores medios de LL y LP (mayores en los suelos CL) no pueden ser achacables más que al distinto porcentaje de partículas arcillosas (Bell, 1998), que es mayor en las muestras de tipo CL.

La actividad de las partículas arcillosas se ha determinado de forma experimental a partir de los datos proporcionados por los análisis de rayos X. Los resultados obtenidos indican que tanto en la subunidad granular como en la cohesiva la fracción arcillosa es inactiva.

En cuanto a las propiedades físicas, no se aprecian diferencias importantes entre ambas subunidades, salvo

en la permeabilidad. Ésta, ante la imposibilidad de realizar ensayos en laboratorio que resulten fiables, se ha calculado por medio de estimaciones tabuladas de acuerdo al tipo de suelo. Los valores obtenidos han resultado coherentes con las características de cada subunidad, de modo que a efectos de estudios previos su empleo puede ser apropiado.

Los fenómenos de expansividad se pueden considerar despreciables para la subunidad granular. En la cohesiva son en cambio más importantes, con presiones de hinchamiento entre 0,11 y 0,06 MPa.

No ha sido posible establecer la historia tensional de estos materiales debido probablemente a los procesos de encostramientos y desecaciones sucesivas, que enmascaran e impiden calcular la presión de sobreconsolidación. Sin embargo, las curvas edométricas se pueden emplear para establecer el umbral de tensión a partir del cual los asentamientos pueden llegar a ser importantes, que se ha estimado en 0,1 MPa.

Los parámetros efectivos que rigen la resistencia al corte de la subunidad granular son $\phi' = 47^\circ$, $c' = 0$, mientras que en estado residual su comportamiento mecánico se rige por un valor $\phi_r' = 38^\circ$. En el caso de la subunidad cohesiva, $\phi' = 43^\circ$, $c' = 0,07$, siendo $\phi_r' = 19^\circ$.

La aplicación de las tablas de correlación entre N_{SPT} y parámetros de resistencia al corte no ha sido posible para los tramos granulares ya que el ensayo de penetración en todos los casos da rechazo, mientras que para los tramos cohesivos se ha podido estimar una resistencia a compresión simple de aproximadamente 1 MPa, valor muy semejante al obtenido ensayando probetas de este tipo de terreno en el laboratorio.

Finalmente, la medida de la velocidad de propagación de ondas P se ha empleado para estimar la ripabilidad de estos materiales. Las velocidades obtenidas, bajas y propias de un suelo, indican que las excavaciones realizadas en la Unidad TL Arcosas del Teso Grande no requerirán métodos especiales de ripado.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación SAO96/03 de la Junta de Castilla y León y BTE2002-04017-C02-02 de la Comisión Interministerial. Asimismo, el trabajo se ha realizado durante el periodo de disfrute de una beca de investigación de la Universidad de Salamanca concedida a J. Nespereira para la realización de su Tesis Doctoral. Agradecemos a la Dra. Mercedes Ferrer Gijón y a un revisor anónimo las sugerencias realizadas para la mejora del manuscrito. Los autores quieren agradecer a la Dra. Mercedes Suárez, del Área de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Salamanca, a Sergio García, de Geoduro S.L. y a Antonio Graña, de Ingema Prevención, la colaboración prestada. Por último, agradecer a los distintos jefes de obra que nos permitieron acceder a las diversas excavaciones visitadas.

Referencias

AENOR (2002). *Geotecnia. Ejecución de trabajos geotécnicos especiales. Ensayos de campo y de laboratorio*. Normas

UNE.

- Alonso Gavilán, G. (1981): *Estratigrafía y sedimentología del Paleógeno en el borde suroccidental de la Cuenca del Duero (provincia de Salamanca)*. Tesis doctoral, Univ. de Salamanca, 435 p.
- Alonso Gavilán, G y Sánchez Benavides, F.J. (1992): Sedimentología del Paleogeno en los alrededores de Salamanca. En: *III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología*. Guía de campo: 300-309. Salamanca.
- Ayala, F.J., Rodríguez Ortiz, J.M^a, Prieto Alcolea, C., Rubio Amo, J., Sanz Contreras, J.L. (1991): *Mapa geotécnico y de riesgos geológicos para ordenación urbana de Murcia*. Escala 1:25.000 y 1:5.000. IGME.
- Bell, F.G. (1998): The geotechnical properties and behaviour of a pro-glacial lake clay and its cementitious stabilization. *Geotechnical and Geological Engineering*, 16: 167-199.
- Bell, F.G. (2000): *Engineering Properties of soils and rocks*. Blackwell Science Ltd., 484 p.
- Blanco, J.A., Molina, E., Martín-Serrano, A. (1983): Alteraciones y paleoalteraciones en la morfología del Oeste Peninsular. *Monografía n° 6 ITGE-SEG*, 286 p.
- Craig, R.F. (2004): *Craig's Soil Mechanics*. Taylor and Francis, 464 p.
- Díez Balda, M.A. (1986): La sucesión estratigráfica del Complejo esquisto-grauváquico al sur de Salamanca. *Estudios Geológicos*, 36: 131-138.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002): *Ingeniería Geológica*. Pearson Education, Madrid, 744 p.
- IAEG (1981): Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 24: 235-274.
- IGME-COPOT, Región de Murcia (2000): Mapa geotécnico y mapas de peligrosidad natural de la ciudad de Cartagena. Escala 1:15.000.
- Jiménez, E. (1972): El paleógeno del borde SW de la Cuenca del Duero. I: Los escarpes del Tormes. *Studia Geologica Salmantica*, 3: 67-110.
- Jiménez Salas, J.A. y Justo Alpañes, J.L. (1975): *Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas*. Editorial Rueda. Madrid, 466 p.
- Lambe, T.W. (1960): *The character and identification of expansive soils*. Federal Housing Administration, Washington.
- López Santiago, F., López Benito, A., Peña Pinto, J.L., Barba Regidor, P., Rodríguez Fernández, L.R., Laín Huerta, L., Mulas de la Peña, J. (1991a): *Mapa geotécnico y de peligrosidad natural de la ciudad de León y su aglomeración urbana*. Escalas 1:25.000 y 1:5.000. Serie: Ingeniería GeoAmbiental. IGME.
- López Santiago, F., López Benito, A., Peña Pinto, J.L., Rodríguez Fernández, L.R., Laín Huerta, L., Mulas de la Peña, J. (1991b): *Mapa Geotécnico y de peligrosidad natural de la ciudad de Ponferrada y su entorno*. Escalas 1:25.000 y 1:4.000. Serie: Ingeniería GeoAmbiental. IGME.
- Nespereira, J.; Yenes, M; Blanco, J.A. (2003): La alteración de las pizarras ordovícicas de la ciudad de Salamanca: implicaciones geotécnicas. *Geogaceta*, 34: 39-42.
- Powrie, W. (2005): *Soil Mechanics: concepts and applications*. 2nd edition. Spon Press, 675 p.
- Santisteban, J.I., Martín-Serrano, A., Monteserín, V. (2000): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja n° 478 (Salamanca)*. IGME, Madrid.
- Schmertmann, J.M. (1955): The undisturbed consolidation of clay, *Trans. ASCE*, 120: 1201 p.
- Skempton, A.W. (1953): The colloidal activity of clay. *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and foundation engineering*, 1: 57-61.
- Suriol Castellví, J., Lloret Morancho, A., Josa García-Tornel, A. (1995): *Geotecnia: reconocimiento del terreno*. Edicions UPC, Barcelona, 100 p.
- UNESCO/IAEG (1976): *Engineering Geological mapping: a guide to their preparation*. Commission on Engineering Geological Maps of the IAEG. Earth Sciences, 15. The UNESCO Press.

Manuscrito recibido el 18 de enero de 2006

Aceptado el manuscrito revisado el 29 de mayo de 2006